

---

## ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem a realizací konstrukce simulátoru Hertzova kontaktu na základě komerčně prodáváných zařízení. Simulátor bude sloužit jako výuková pomůcka při výuce kontaktní mechaniky. V práci je uvedeno teoretické minimum nutné pro analytický výpočet kontaktu koule s deskou. Součástí práce je technická dokumentace.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Simulátor Hertzova kontaktu, kontaktní oblast, styk těles, zatěžující síla.

## ABSTRACT

This bachelor thesis deals with project and implementation of construction of the Hertzian contact apparatus based on commercial devices. This device will serve as education facility of Contact mechanics. Theoretical minimum needed for analytic calculation of contact between a rigid sphere and flat surface is mentioned in this thesis. Technical documentation is included.

## KEY WORDS

Hertzian contact apparatus, contact area, contact of solids, load.

---

---

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

MAREK, J. Simulátor Hertzova kontaktu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 32 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.

---

## PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat všem, kteří se na tvorbě mé bakalářské práce podíleli. Zvláštní poděkování za cenné rady, věcné připomínky a ochotu patří vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Martinu Hartlovi, Ph.D. Dále bych chtěl poděkovat doktorandovi Ing. Vladimíru Čudkovi za cenné rady při vytváření technické dokumentace.

---

**OBSAH**

<b>OBSAH .....</b>	<b>11</b>
<b>ÚVOD .....</b>	<b>12</b>
<b>1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ.....</b>	<b>13</b>
1.1 Simulátor Hertzova kontaktu TM262.....	13
1.2 Simulátor Hertzova kontaktu TE98.....	13
1.3 Simulátor Hertzova kontaktu pro experimentální úlohy .....	14
1.3.1 Měření kontaktní plochy pomocí laserového profilometru .....	14
1.3.2 Měření přiblížení kontaktních těles pomocí snímače polohy .....	15
<b>2 TECHNICKÁ A VÝVOJOVÁ ANALÝZA .....</b>	<b>17</b>
2.1 Mechanická část zařízení.....	17
2.2 Optická část zařízení.....	18
2.3 Řešení kontaktní úlohy .....	19
2.3.1 Analytické řešení kontaktní úlohy .....	19
<b>3 CÍL PRÁCE A METODICKÝ PŘÍSTUP K ŘEŠENÍ.....</b>	<b>22</b>
<b>4 VARIANTY ŘEŠENÍ.....</b>	<b>23</b>
4.1 Varianta s mechanickým zatížením .....	23
4.2 Varianta s hydraulickým zatížením .....	24
<b>5 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ .....</b>	<b>25</b>
5.1 Uložení kuliček.....	26
5.2 Vložka kuliček.....	26
5.3 Pracovní píst .....	27
5.4 Víko .....	27
5.5 Ovládací příruba .....	28
5.6 Válec.....	28
<b>6 ZÁVĚR .....</b>	<b>29</b>
<b>7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....</b>	<b>30</b>
<b>8 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A VELIČIN.....</b>	<b>31</b>
<b>9 SEZNAM OBRÁZKŮ, GRAFŮ A TABULEK .....</b>	<b>32</b>
9.1 Seznam obrázků.....	32
9.2 Seznam grafů .....	32
9.3 Seznam tabulek.....	32
<b>10 SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>33</b>
10.1 Technická dokumentace .....	33

---

## ÚVOD

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem a realizací simulátoru Hertzova kontaktu. Jedná se o zařízení, které je schopné simulovat kontakt dvou těles a zobrazit tvar kontaktní oblasti. Od velikosti a tvaru kontaktní oblasti se odvíjí napjatost, která v kontaktu vzniká.

Jako první se problematikou vzniku napjatosti v kontaktní oblasti zabýval známý fyzik H. R. Hertz už v devatenáctém století. Ačkoliv je v dnešní době vytvořeno mnoho přesnějších teorií, je stále jeho teorie nepostradatelným nástrojem při výpočtu jednoduchých kontaktních úloh.

První část práce je zaměřena na výpočet kontaktu kuličky se sklem a druhá část se zabývá samotnou konstrukcí simulátoru. Hlavní důraz při konstrukci zařízení je kladen na kompaktnost a nízkou výrobní cenu.

Zařízení bude využito při výuce kontaktních úloh pro ověření vypočítaných výsledků a při studii tenkých mazacích filmů.

## 1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

1

Na základě zjištěných informací a prostudované literatury lze prohlásit, že simulátor Hertzova kontaktu není komerčně prodávané zařízení. Na trhu jsou dostupná pouze zařízení, která slouží pro výukové účely.

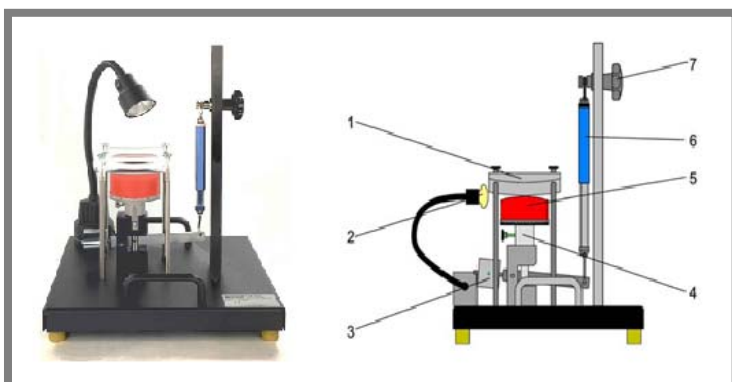
V současné době to jsou simulátory TM262 od výrobce GUNT a TE98 od TecQuipment. Obě zařízení simulují kontaktní úlohu dvou zakřivených těles. Zjišťuje se závislost velikosti a tvaru kontaktní oblasti na zatěžující síle a změně křivosti stýkajících se těles. Odečítání velikosti kontaktní plochy je pouze vizuální.

V praxi se při řešení kontaktní úlohy experimentálním způsobem navrhne zařízení, které je určeno pro řešení konkrétního problému. U těchto zařízení se kontaktní plocha neodečítá vizuálně, ale pro zobrazení se používá zvětšovací optický přístroj.

### 1.1 Simulátor Hertzova kontaktu TM262

1.1

Kontakt dvou těles je reprezentován pryžovým tělesem a plastovou deskou. První kontaktní těleso je uchyceno ve válci a je mu umožněn axiální pohyb. Druhé kontaktní těleso (deska) je pevně spojeno se zařízením (obr. 1-1). Zatěžující síla je vyvozena pákovým mechanismem a má maximální velikost  $P = 25 \text{ N} \pm 0,5 \text{ N}$  [11].



Legenda:

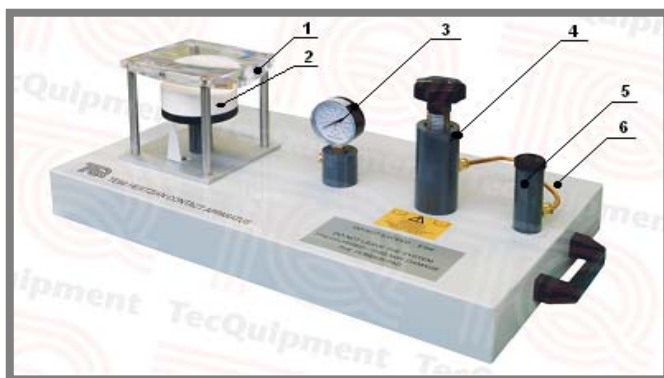
1. plastová deska,
2. zdroj světla,
3. vyvažovací hmota,
4. natáčecí mechanismus,
5. pryžové kontaktní těleso,
6. siloměr,
7. posuvný jezdec.

Obr. 1-1 Simulátor Hertzova kontaktu TM262 [11].

### 1.2 Simulátor Hertzova kontaktu TE98

1.2

Kontakt těles je také simulován pryžovým tělesem a plastovou deskou. Pryžové kontaktní těleso je připevněno k pracovnímu pístu, který je pohyblivě uložen v hydraulickém válci. Tlakovacím přípravkem je vyvolán tlak, který vytvoří zatěžující sílu v kontaktu. Maximální dovolený tlak soustavy je kontrolován tlakovým redukčním ventilem. Při přetížení tlaku v soustavě dojde k otevření ventilu a tím ke snížení tlaku. Velikost působící síly v kontaktu je získána přepočtem z hydraulického tlaku. Ten je odečten na manometru [12]. Schéma simulátoru TE98 je zobrazeno na obr. 1-2.



**Legenda:**

1. plastová deska,
2. pryžové těleso,
3. hydraulický manometr,
4. tlakovací přístavek,
5. tlakový redukční ventil,
6. deska.

Obr. 1-2 Simulátor Hertzova kontaktu TE98 [12].

---

### 1.3 Simulátor Hertzova kontaktu pro experimentální úlohy

V technické praxi se simulátory Hertzova kontaktu většinou používají pro experimentální úlohy. Zjišťuje se velikost kontaktní plochy, případně mechanické vlastnosti zkoušeného materiálu. Podle [6] patří mezi dvě nejznámější experimentální úlohy:

1. měření přiblížení mezi kontaktními tělesy pomocí snímače polohy
2. měření kontaktní plochy laserovým profilometrem.

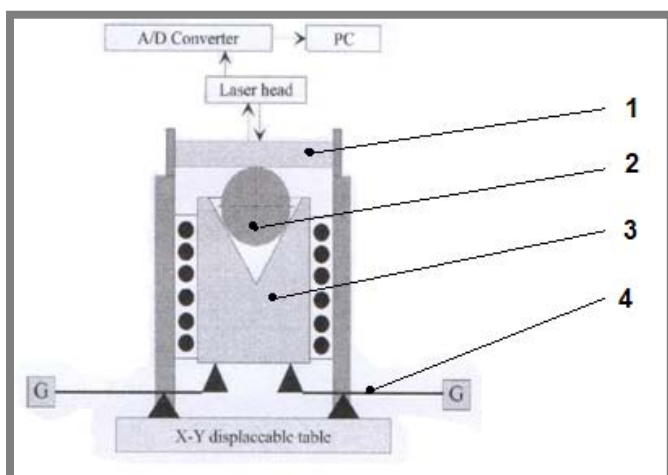
---

#### 1.3.1 Měření kontaktní plochy pomocí laserového profilometru

Metoda je založena na principu reflexe světla, konkrétně laserového paprsku [6]. Zařízení (obr. 1-3) se skládá z pístu, válce a laserového profilometru. Píst je pohyblivě uložen ve válci a je opatřen uložením pro kontaktní těleso (kulička). V horní části válce je upevněno druhé kontaktní těleso (sařirové sklo). Síla v kontaktu je vyvolána pákovým mechanismem.

Po zatížení kontaktních těles vyšle laserová jednotka do kontaktní oblasti laserový paprsek. Vzhledem k tomu, že se v kontaktní oblasti nacházejí dvě prostředí (sklo, materiál kontaktního tělesa) a mimo oblast se nacházejí tři prostředí (sklo, vzduch, materiál kontaktního tělesa), dojde k rozdílné reflexi. Laserová jednotka tento rozdíl odhalí a vyšle signál počítači. Před zpracováním signálu musí dojít k jeho digitalizaci. Počítač daný stav vyhodnotí a vykreslí kontaktní plochu (obr. 1-4).

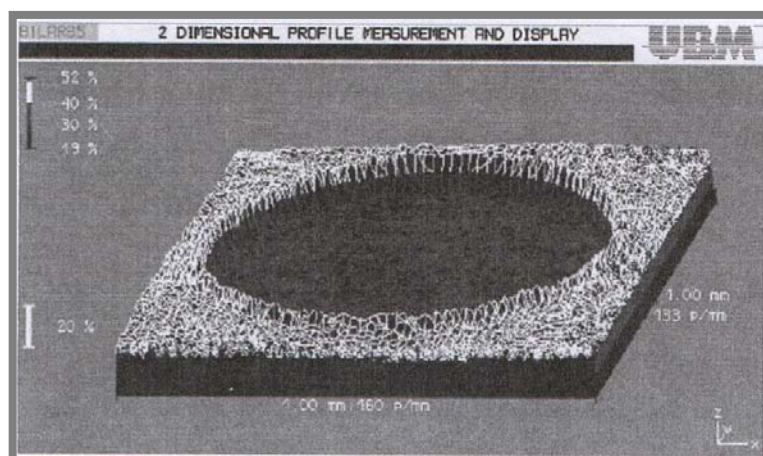
E. Diaconescu a M. Glovnea [6] provedli experimentální měření kontaktní úlohy pomocí laserového profilometru. Jako kontaktní tělesa byla použita ocelová kulička z materiálu SUJ2 o  $\varnothing$  16 mm a sařirového sklo o tloušťce 3 mm. Tělesa se zatěžovala posloupností sil o velikosti 0,1 N; 40 N; 194 N; 292 N; 826 N; 1560 N. Zjišťovala se přesnost zařízení v závislosti na zatěžující síle. Bylo zjištěno, že metoda vykazuje přesné výsledky při vyšších zatíženích.



**Legenda:**

1. safírové sklo,
2. kontaktní těleso,
3. pracovní píst,
4. pákový mechanismus.

Obr. 1-3 Simulátor Hertzova kontaktu s laserovým profilometrem [6].



Obr. 1-4 Digitální výstup kontaktní plochy [6].

### 1.3.2 Měření přiblížení kontaktních těles pomocí snímače polohy

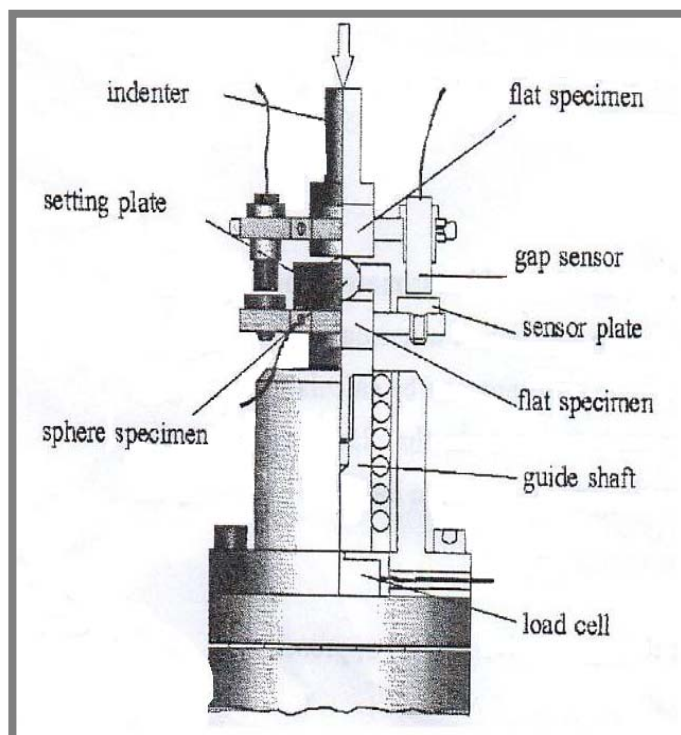
1.3.2

M. Shima a kol. [7] se zabývali výrobou zařízení (obr. 1-7), které by bylo schopné v krátkém časovém úseku zjistit Youngův modul pružnosti zkoušeného tělesa. Zařízení pracuje na principu vzájemného přiblížení dvou těles. Mezi dvě ocelové desky je vložen zkušební vzorek, nejčastěji kulička. Vzájemné přiblížení desek  $\delta$  měříme snímačem polohy, který pracuje s přesností až  $0,02 \mu\text{m}$ . Hledaný Youngův modul pružnosti vzorku se pak dopočítá z Hertzových rovnic.

Celé zkušební zařízení je složeno ze dvou samostatných zařízení. První obstarává zatížení kontaktních těles. Nejčastěji je použito zařízení pro měření tvrdosti podle Vickerse. Zatěžující síla má pak velikosti  $P = 264 \text{ N}$ . Druhé zařízení (obr. 1-5) obstarává kontakt těles.

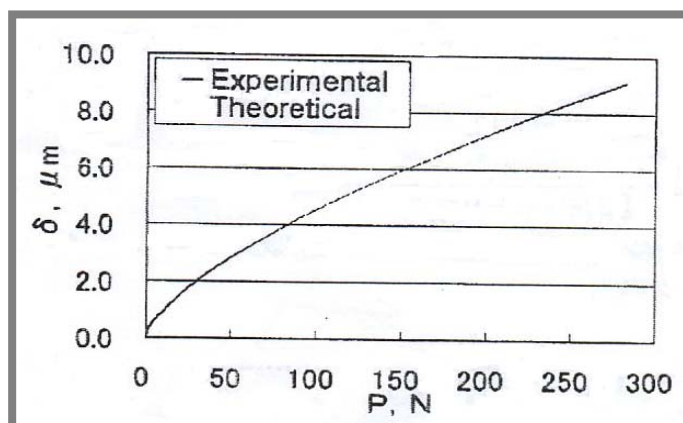
Zařízením se provedlo 100 měření od každého materiálu a zjišťoval se průměrný Youngův modul pružnosti. Tato hodnota se porovnávala s tabulkově udávanou hodnotou pro daný materiál. V tab. 1-1 jsou shrnuty výsledky měření.





Obr. 1-5 Zařízení pro měření Youngova modulu pružnosti [7].

Graf 1-1. vyjadřuje závislost mezi působící silou v kontaktu a relativní přiblížením těles. Při zatížení 264 N dojde k relativnímu přiblížení  $\delta = 8,7 \mu\text{m}$ .



Graf 1-1. Závislost relativního přiblížení na zatěžující síle [7].

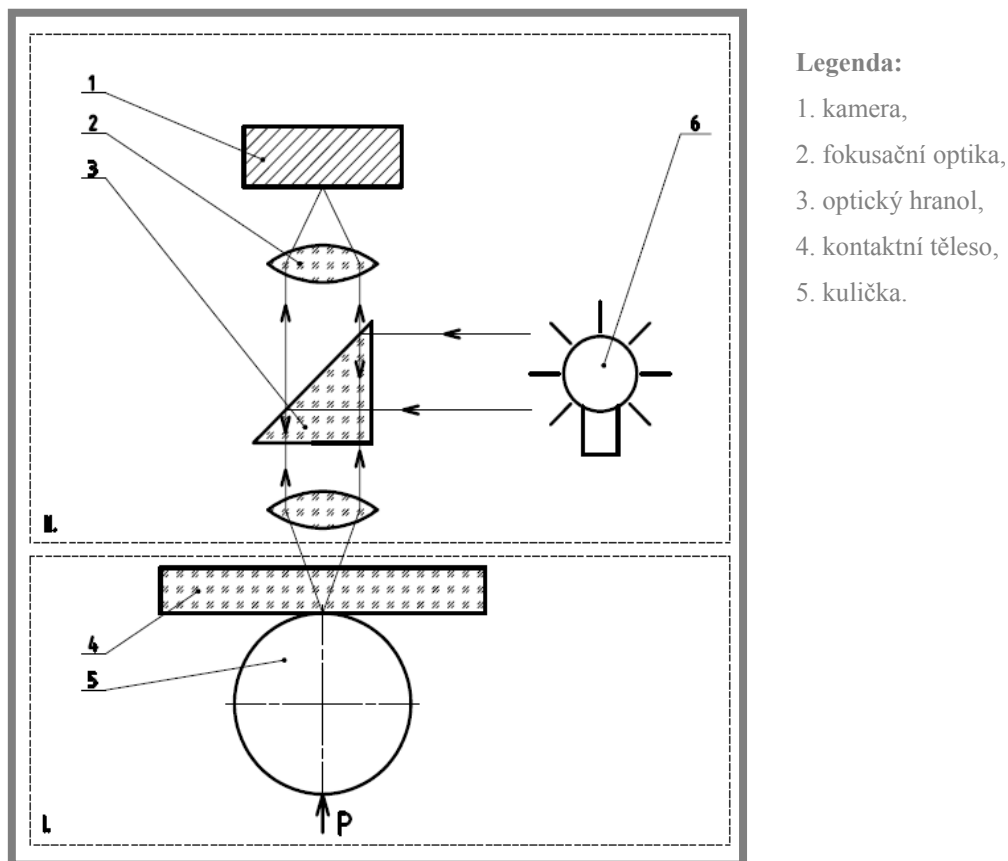
Tab. 1-1 Porovnávací tabulka [7].

Materiál	Změřená hodnota	Udávaná hodnota
$\text{Al}_2\text{O}_3$	$E = 360 \text{ GPa}$ pro $\mu = 0,22$ $E = 355 \text{ GPa}$ pro $\mu = 0,25$	370 MPa
$\text{Si}_3\text{N}_4$	$E = 315 \text{ GPa}$ pro $\mu = 0,22$ $E = 311 \text{ GPa}$ pro $\mu = 0,25$	300 MPa
SUJ2	$E = 206 \text{ GPa}$ pro $\mu = 0,3$	208 MPa

## 2 TECHNICKÁ A VÝVOJOVÁ ANALÝZA

2

Simulátor Hertzova kontaktu (obr. 2-1) je zařízení, které se skládá ze dvou samostatných částí. První část je mechanická. Zajišťuje kontakt mezi tělesy a vytváří zatěžující sílu. Druhá část je optická. Slouží pro vizualizaci kontaktu.



Obr. 2-1 Jednoduché schéma simulátoru Hertzova kontaktu.

### 2.1 Mechanická část zařízení

2.1

Tato část zařízení vytváří zatěžující sílu, která je nezbytná pro vytvoření kontaktní oblasti. Zatížení může být vyvoláno mechanicky, pneumaticky, nebo hydraulicky. Podle způsobu zatížení se odvíjí konstrukce zařízení.

Mechanické zatížení je většinou reprezentováno pákovým mechanismem. Síla je vyvolána siloměrem (jednozvratná páka), případně závažím (dvoezvratná páka). Při větším zatížení nastává problém v konstrukci. Používá se při nižším zatěžování pro snadný přepočet působící síly.

Pneumatické zatěžování pracuje se stlačeným vzduchem. Je vhodné pro vyšší zatěžování. Nevýhodou je závislost na zásobě tlakového vzduchu.

Hydraulické zatěžování využívá tlaku kapaliny. Často se používá při vyšším zatěžování. Výhoda je v jednoduchosti obsluhy a nezávislosti na vnějším zdroji energie.

Mechanická část zařízení se také zabývá uložením kontaktních těles. Prvním kontaktním tělesem je ložisková kulička, která splňuje základní geometrické předpoklady. Je to kruhovitost, drsnost povrchu a rozměrová přesnost. Nejčastěji používanými materiály ložiskových kuliček jsou chromová ocel AISI 52100, karbid wolframu WC a nitrid křemičitý  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . V tab. 2-1 je uveden přehled mechanických vlastností a hustoty těchto materiálů.

Jeden z nejpoužívanějších materiálů pro výrobu ložiskových kuliček je chromová ocel AISI 52100 s chemickým složením 1 % C; 1,4 % Cr; 0,25-0,45 % Mn. Kuličky vykazují vynikající povrchové vlastnosti, mají dobrou tvrdost a pevnost. Jsou kaleny v celém svém průřezu. Dosahovaná tvrdost je v rozmezí 60-66 HRC [13].

Kuličky z karbidu wolframu WC s chemickým složením 94 % WC; 6 % Co, vykazují lepší šokovou odolnost než kuličky z chromové oceli. Používají se v důlních aplikacích, kde jsou kladeny vysoké nároky na pevnost a ořezuvzdornost [13].

Kuličky z nitridu křemíku  $\text{Si}_3\text{N}_4$  s chemickým složením 87 %  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ; 13 % ostatní prvky jsou vhodné pro vysoce náročné aplikace. Vykazují výborné vlastnosti v hybridních ložiscích. Často se používají v hi-tech aplikacích. Mohou pracovat až při teplotách 1000° C [13].

Tab. 2-1 Mechanické vlastnosti ložiskových kuliček [13].

Materiál	Youngův modul pružnosti (GPa)	Poissonovo číslo (-)	Hustota ( $\text{kg/m}^3$ )
Chromová ocel	$E = 207$	$\mu = 0,3$	$\rho = 7830$
Karbid wolframu	$E = 641$	$\mu = 0,26$	$\rho = 14950$
Nitrid křemíku	$E = 310$	$\mu = 0,24$	$\rho = 3220$

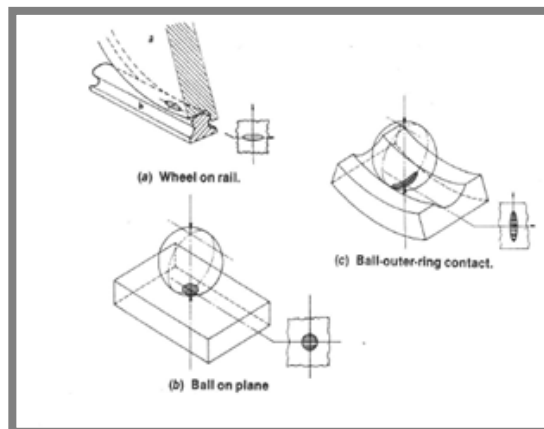
Druhým kontaktním materiálem je skleněná deska vyrobená z borosilikátového skla BK7. Jedná se o nejpoužívanější optický materiál, který má vzhledem k safírovému sklu nižší mechanické vlastnosti ( $E = 82\text{GPa}$ ,  $\mu = 0,206$ ), ale je mnohonásobně levnější.

## 2.2 Optická část zařízení

Vzhledem k tomu, že poloměr kontaktní oblasti má přibližně 250  $\mu\text{m}$ , musí se pro zobrazení použít mikroskop. Komerčně prodávané mikroskopy nejsou schopny kontaktní plochu zobrazit. Je to dáno tím, že předmětová rovina pro zobrazování leží v místě kontaktu. Musí se tedy použít mikroskopového objektivu s prodlouženou pracovní vzdáleností. Vzhledem k rozsahu vzniklého problému bude optická část simulátoru Hertzova kontaktu řešena jako samostatná bakalářská, případně diplomová práce.

## 2.3 Řešení kontaktní úlohy

V současné době se používají dvě metody pro řešení kontaktní úlohy. Jedná se o numerické a analytické řešení. Při numerickém řešení se využívají softwarové nástroje, například ANSYS, ADINA, ABAQUS a další. Při Analytickém řešení se vychází z Hertzovy teorie kontaktu těles. Jediný způsob, jak si vypočtené výsledky ověřit, je provedení experimentu. Na obr. 2-2 je základní přehled kontaktů, které se v praxi často vyskytují.



Obr. 2-2 Přehled nejčastějších kontaktů [5].

### 2.3.1 Analytické řešení kontaktní úlohy

Analytické řešení je založeno na Hertzově teorii kontaktu. Protože byla teorie odvozena na základě zjednodušujících předpokladů, vypočtené hodnoty se mírně liší od skutečných. Mezi základní zjednodušující předpoklady patří úvaha o zanedbání tření a statickém zatěžování. V počáteční fázi kontaktu se tělesa dotýkají v jediném bodě, případně mají liniový dotyk. Kontaktní tělesa jsou z materiálu, který je homogenní, izotropní a lineárně elastický. Předpokládá se malá deformace a malá styková plocha vzhledem k rozměrům tělesa.

Následující výpočet kontaktu koule s deskou vychází z práce publikované K. L. Johnsonem [7] v roce 1987. Zatěžující síla byla zvolena  $P = 100\text{N}$ . Poloměr kontaktní oblasti ložiskové kuličky z chromové oceli a skla z BK7 je pak dána vztahem

$$a = \sqrt[3]{\frac{3PR^*}{4K}} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 100\text{N} \cdot 12,7\text{mm}}{4 \cdot 4.62213\text{MPa}}} = 0,248\text{mm}, \quad (1)$$

kde  $a$  (mm) je poloměr kontaktní oblasti,  $P$  (N) je zatěžující síla,  $R^*$  (mm) je ekvivalentní poloměr křivosti a  $K$  (MPa) je redukovaný modul pružnosti. Ekvivalentní poloměr křivosti  $R$  se vypočte rovnicí

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{1}{12,7\text{mm}} + \frac{1}{0} = \frac{1}{12,7}\text{mm}^{-1}, \quad (2)$$

kde  $R_{1,2}$  (mm) je poloměr křivosti kontaktního tělesa.

Redukovaný modul pružnosti je dán vztahem

$$K = \frac{E_1 \cdot E_2}{E_1 \cdot (1 - \mu_2^2) + E_2 \cdot (1 - \mu_1^2)} = \frac{207000 \text{ MPa} \cdot 82000 \text{ MPa}}{207000 \text{ MPa} \cdot (1 - 0,206^2) + 82000 \text{ MPa} \cdot (1 - 0,3^2)}$$

$$K = 62213 \text{ MPa}, \quad (3)$$

kde  $E_{1,2}$  (MPa) je Youngův modul pružnosti a  $\mu_{1,2}$  je Poissonovo číslo. Nejdůležitější veličina kontaktní úlohy je maximální Hertzův tlak. Tento tlak se nachází ve středu kontaktní plochy. Tvar Hertzova tlaku je závislý na tvaru kontaktní oblasti. Jeho velikost je dána vztahem

$$p_o = \frac{3P}{2\pi \cdot a^2} = \frac{3 \cdot 100 \text{ N}}{2\pi \cdot 0,248^2 \text{ mm}^2} = 776 \text{ MPa}, \quad (4)$$

kde  $p_o$  (MPa) je maximální Hertzův tlak. Tlak na obecném poloměru  $r$  je dán rovnicí

$$p = p_o \left[ 1 - \frac{r^2}{a^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{MPa}), \quad (5)$$

kde  $p$  (MPa) je Hertzův tlak na poloměru  $r$ . Tento poloměr patří do intervalu  $<0; a>$ . Normálové napětí v závislosti na vzdálenosti od povrchu tělesa je dáno rovnicí

$$\sigma_x = \sigma_y = -p_o \left[ \left( 1 - \left| \frac{z}{a} \right| \tan^{-1} \left( \frac{1}{|z/a|} \right) \right) \cdot (1 + \mu_{1,2}) - \frac{1}{2 \cdot \left( 1 + \frac{z^2}{a^2} \right)} \right] \quad (\text{MPa}), \quad (6)$$

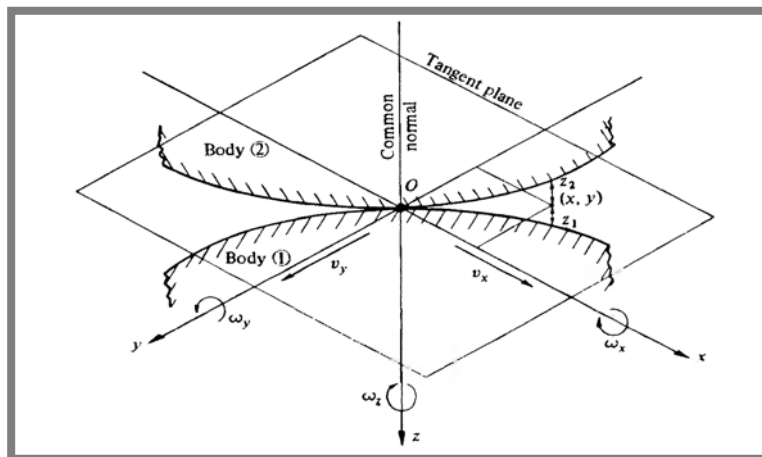
$$\sigma_z = \frac{-p_o}{1 + \frac{z^2}{a^2}} \quad (\text{MPa}), \quad (7)$$

kde  $\sigma_{x,y,z}$  (MPa) je složka normálového napětí a  $z$  (mm) je vzdálenost od povrchu tělesa. Smykové napětí v kontaktu je potom dáno vztahem

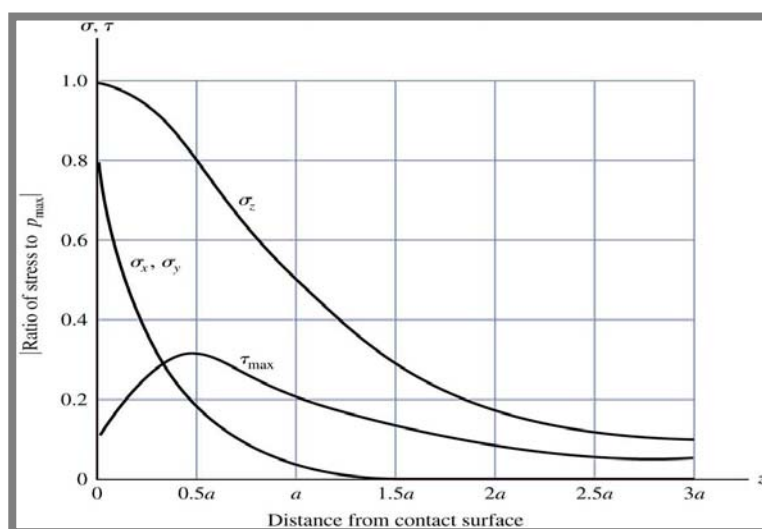
$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2} \quad (\text{MPa}), \quad (8)$$

kde  $\tau_{\max}$  (MPa) je smykové napětí a  $\sigma_{1,2,3}$  (MPa) je hlavní napětí.

Poloha jednotlivých os a rovin v kontaktní oblasti je zobrazena na obr. 2-3. V grafu 2-1 je pak znázorněn průběh napětí v závislosti na vzdálenosti od povrchu. V tab. 2-2 jsou vypočítány hodnoty kontaktní úlohy pro ostatní materiály kuliček.



Obr. 2-3 Poloha jednotlivých os a rovin [7].



Graf 2-1. Grafický průběh napětí [1].

Tab. 2-2 Hodnoty kontaktní úlohy.

Průměr kuličky	ø 25,4 mm			ø 20 mm			ø 13,5 mm		
	<i>a</i> (mm)	<i>K</i> (MPa)	<i>p<sub>o</sub></i> (MPa)	<i>a</i> (mm)	<i>K</i> (MPa)	<i>p<sub>o</sub></i> (MPa)	<i>a</i> (mm)	<i>K</i> (MPa)	<i>p<sub>o</sub></i> (MPa)
WC	0,232	76149	886	0,214	76149	1039	0,188	76149	1350
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	0,241	67946	821	0,223	67946	963	0,195	67946	1252
AISI 52100	0,248	62213	774	0,229	62213	908	0,201	62213	1180

### **3 CÍL PRÁCE A METODICKÝ PŘÍSTUP K ŘEŠENÍ**

Cílem této bakalářské práce je návrh a realizace mechanické části simulátoru Hertzova kontaktu. Zařízení bude především sloužit pro názornou výuku kontaktní mechaniky, ale může být použito také pro ověřování výsledků kontaktních úloh. Předpokládá se, že bude se zařízením manipulováno, musí být tedy kompaktní, lehké a nezávislé na vnějším zdroji energie.

Nejdůležitějším konstrukčním uzlem je volba způsobu zatěžování. Od této volby se odvíjí celá konstrukce zařízení.

Dalším konstrukčním uzlem je návrh vhodného uchycení kontaktních těles, přičemž důraz je kladen na jednoduchost výměny a variabilitu.

Po vyřešení těchto dvou nejdůležitějších konstrukčních uzlů se provede konstrukce celého zařízení.

## 4 VARIANTY ŘEŠENÍ

4

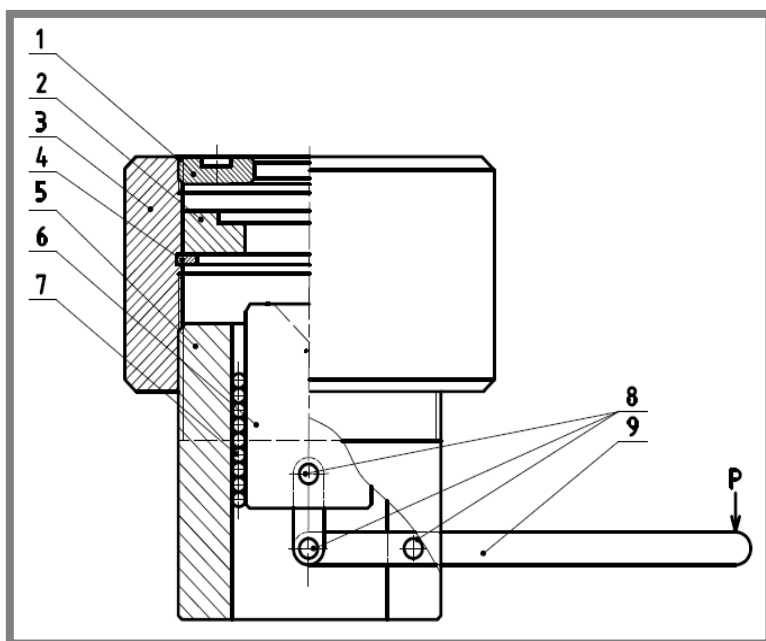
### 4.1 Varianta s mechanickým zatížením

4.1

Tato konstrukce vychází z komerčně vyráběného zařízení TM262. Zařízení je složeno z víka, válce, pístu a pákového mechanismu. Spojení víka s válcem je tvarové, konkrétně závitem M72x1. Optické těleso je upevněno ve víku a vystředěno distančním kroužkem. Kroužek je vyroben ze silonu, který je dobře obrobitelný. Distanční kroužek s optickým tělesem jsou k sobě přitlačovány tlakem, který vytváří zajišťovací matice. Tímto způsobem lze upnout kontaktní tělesa od tloušťky 3 mm až 18 mm. Tento typ uložení umožňuje snadnou výměnu kontaktního tělesa a rychlé nastavení pracovní vzdálenosti. Samovolnému vypadnutí kontaktního tělesa při demontáži víka je zabráněno pojistným kroužkem.

Zatěžující síla je vytvořena pákovým mechanismem s nízkými energetickými ztrátami v čepech.

Páka je spojena s pohyblivě uloženým pracovním pístem, v němž je vytvořeno kuželové uložení pro druhé kontaktní těleso. Těleso je uloženo volně. Kuželové uložení umožňuje použít kontaktní tělesa od  $\varnothing 13$  mm až do  $\varnothing 25,4$  mm. Výměnu kuličky lze provést pouze po demontáži víka. Doporučený materiál pro výrobu zařízení je ocel třídy 11 nebo 12.

**Legenda:**

1. zajišťovací matice,
2. distanční kroužek,
3. víko,
4. pojistný kroužek,
5. válec,
6. pracovní píst,
7. pohyblivé uložení,
8. čep,
9. páka.

Obr. 4-1 Návrh zařízení s mechanickým zatížením.

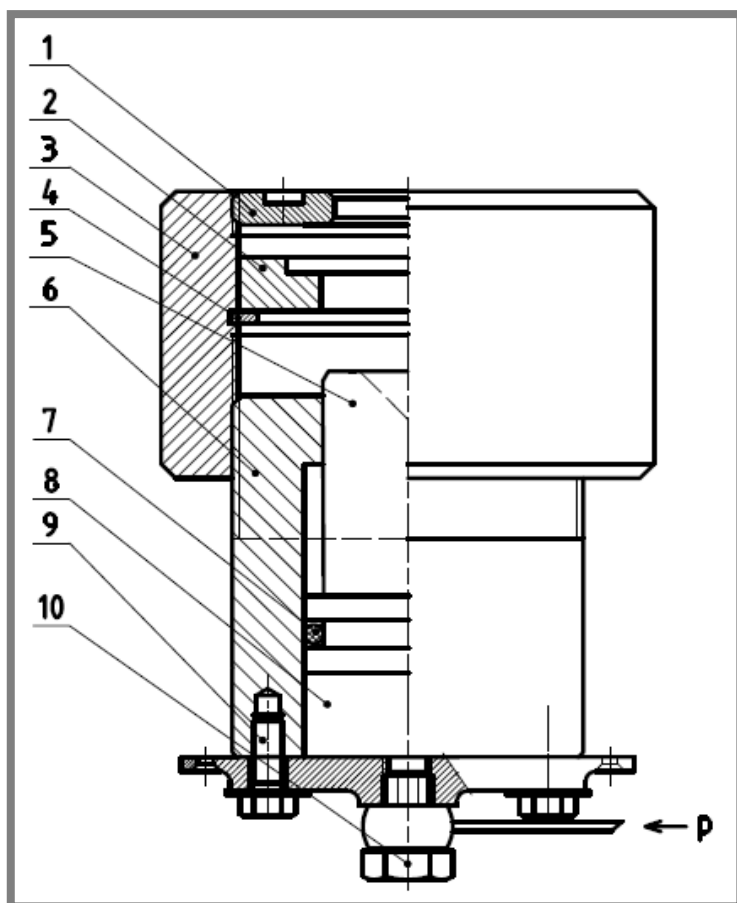


## 4.2 Varianta s hydraulickým zatížením

Při návrhu se vychází z konstrukce komerčně prodáváného zařízení TE98. Zařízení se skládá z víka, válce, pístu a hydraulického obvodu. Spojení víka s válcem a uchycení kontaktních těles je konstrukčně stejné jako u varianty s mechanickým zatížením.

Zatěžovací síla je vyvolána hydraulickým tlakem. Tlak je vytvořen v tlakovacím přípravku a do pracovního prostoru je veden hydraulickým vedením. Pracovní píst je uložen pohyblivě ve válci a proti úniku tlaku je utěsněn O – kroužkem. Prostor tlakového oleje mezi pístem a přírubou je utěsněn papírovým těsněním.

Tento způsob zatěžování je náchylnější na kvalitu povrchů dotýkajících se těles. Vzhledem k pracovnímu médiu je doporučeno vyrobít zařízení z nerezavějící oceli třídy 17.



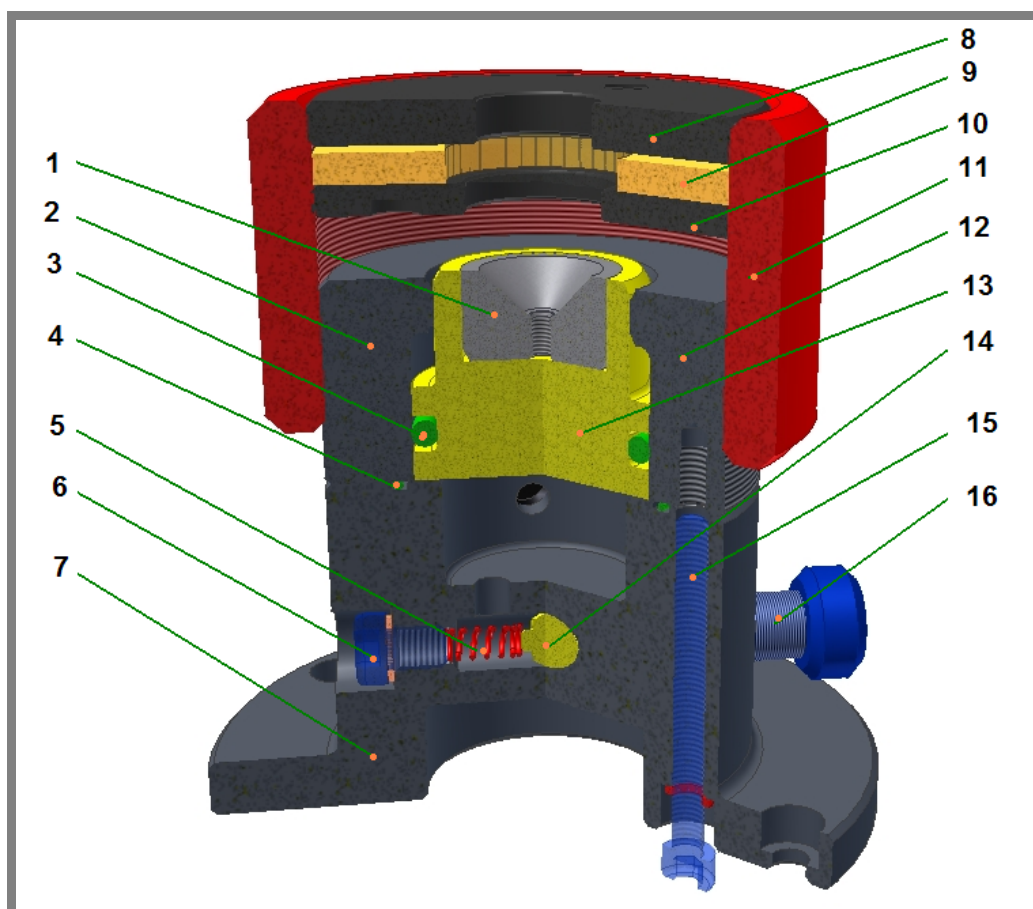
### Legenda:

1. zajišťovací matice,
2. distanční kroužek,
3. víko,
4. pojistný kroužek,
5. pracovní píst,
6. válec,
7. O – kroužek,
8. prostor oleje,
9. šroub příruby,
10. průtočný šroub.

Obr. 4-2 Návrh zařízení s hydraulickým zatížením.

## 5 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

Při konstrukci simulátoru Hertzova kontaktu jsou využity poznatky ze zařízení TE98. Optické kontaktní těleso je uloženo ve víku pomocí dvou matic. Druhé kontaktní těleso je uloženo volně v pracovním pístu. Zatěžující síla je získána tlakem oleje, který působí na pracovní píst. Z geometrie pístu a zatěžující síly je zjištěna maximální velikost tlaku oleje v soustavě  $p = 0,069 \text{ MPa}$ . Tlak v soustavě je vyvolán tlakovým pístem, který je ovládán ovládacím šroubem. Velikost zatěžující síly je pak dán rozdílem síly, kterou vytvoří tlak v soustavě a ztrátové síly v těsnění zařízení. Pro výrobu zařízení je použita nerezavějící ocel třídy 17.



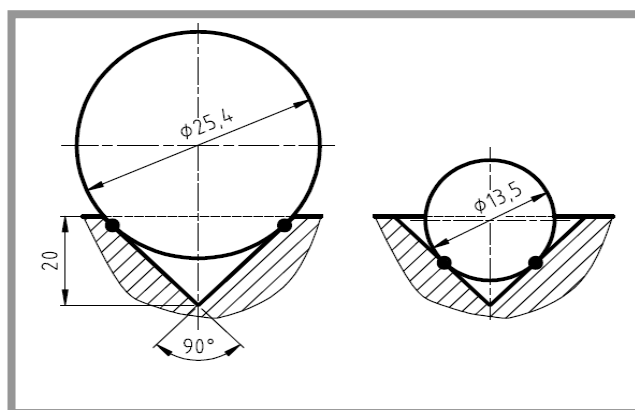
Obr. 5-1 Řez sestavou Hertzova simulátoru.

### Legenda:

- |                    |                               |                     |
|--------------------|-------------------------------|---------------------|
| 1. vložka kuliček, | 7. ovládací příruba,          | 14. tlakový píst,   |
| 2. válec,          | 8. horní zajišťovací matice,  | 15. šroub příruby,  |
| 3. O – kroužek,    | 9. vymežovací kroužek,        | 16. ovládací šroub. |
| 4. O – kroužek,    | 10. dolní zajišťovací matice, |                     |
| 5. tlačná pružina, | 11. víko,                     |                     |
| 6. opěrný šroub,   | 13. pracovní píst,            |                     |

### 5.1 Uložení kuliček

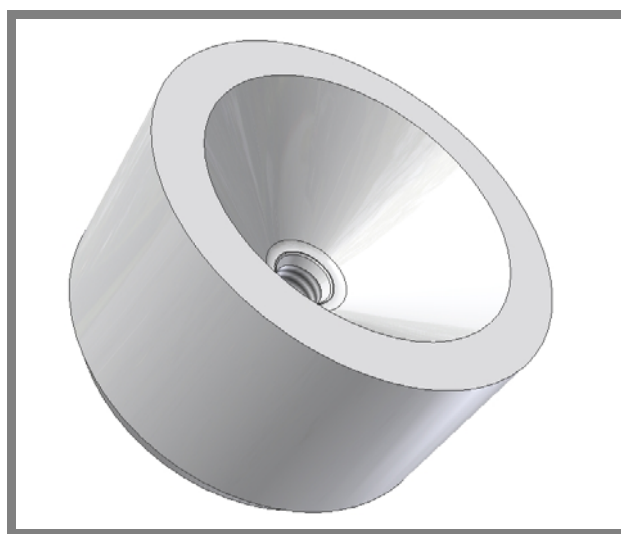
Kuličky jsou uloženy v kuželu s vrcholový úhlem  $90^\circ$ . Pro navrženou geometrii byla provedena simulace uložení kuliček pro  $\varnothing 13,5$  mm a  $\varnothing 25,4$  mm (obr. 5-1). Poloha stykových bodů kuličky s kuzelem je zvýrazněna. Uložení kuliček není vytvořeno v pracovním pístu, ale ve vložce kuliček (obr. 5-2). Toto konstrukční řešení nám umožní vyšší variabilitu kontaktních těles. Jestliže je měřena kontaktní úloha pro jiný rozměr kontaktního tělesa, než pro jaký je zařízení konstruované, vyrobí se pouze vložka kuliček s jinou geometrií uložení.



Obr. 5-2 Geometrie uložení kuliček.

### 5.2 Vložka kuliček

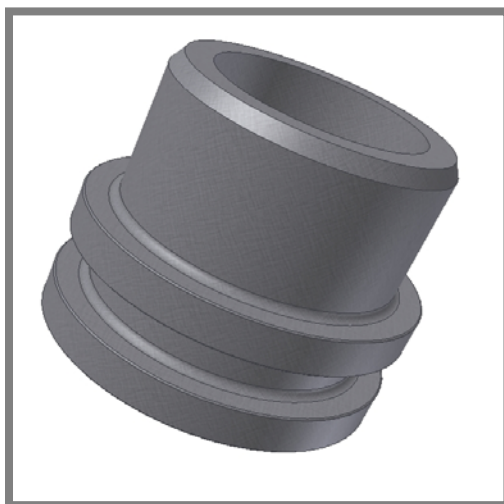
Ve vložce je vyrobeno kuželové uložení kuliček. Vložka je vsunuta do vybraní pracovního pístu. Pro snadné vyjmutí vložky z pístu je opatřena závitem M4. Vložka je vyrobena z oceli 17 022.



Obr. 5-3 Vložka kuliček.

### 5.3 Pracovní píst

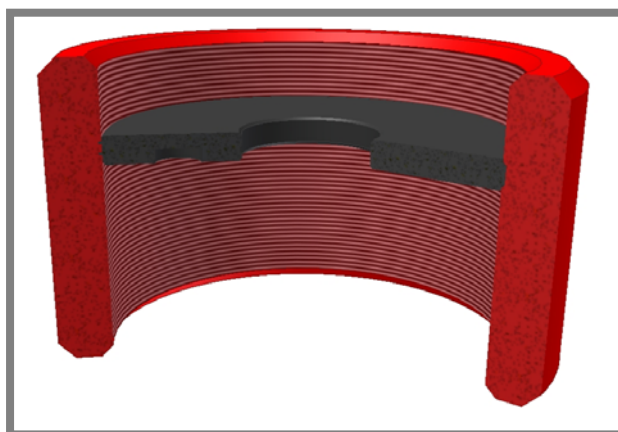
Pracovní píst (obr. 5-4) je uložen pohyblivě ve válci a proti úniku tlaku kapaliny mezi válcem a pístem je utěsněn O – kroužkem PN 02 9280.2 Rubena 43x35. Rozměry, drsnosti povrchu a stupně přesnosti pístu jsou voleny podle doporučení výrobce těsnění. V pístu je vytvořeno vybrání pro vložku kuliček.



Obr. 5-2 Pracovní píst.

### 5.4 Víko

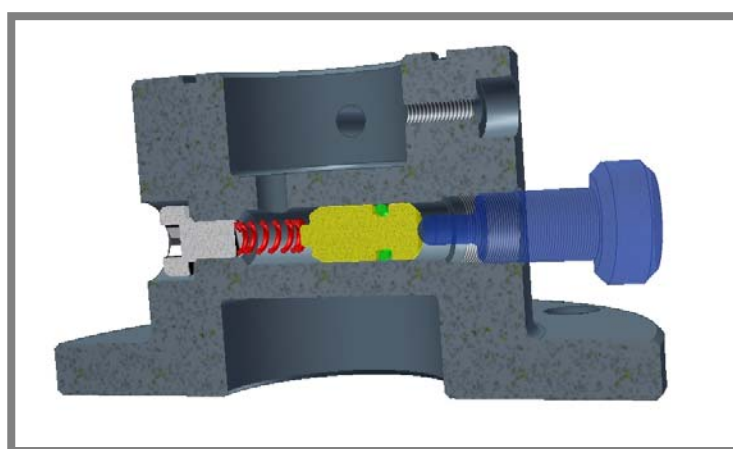
Víko je určeno pro uložení optického tělesa. Na povrchu je opatřeno vroubkováním pro lepší manipulaci. Na vnitřní části matice je vytvořen závit M72x1 po celé délce víka. Opěrné místo proti vypadnutí kontaktního tělesa je vytvořeno opěrnou maticí. Mezi matice je vložen silonový vymezovací kroužek, který zajišťuje správnou polohu optického tělesa. Tento způsob uložení je oproti použití kombinace zajišťovacího a distančního kroužku více variabilní. Vzhledem k vysokému zatížení musí být pracovní plochy zajišťovacích matic broušeny, aby nedošlo k poškození optického kontaktního tělesa.



Obr. 5-3 Víko.

## 5.5 Ovládací příruba

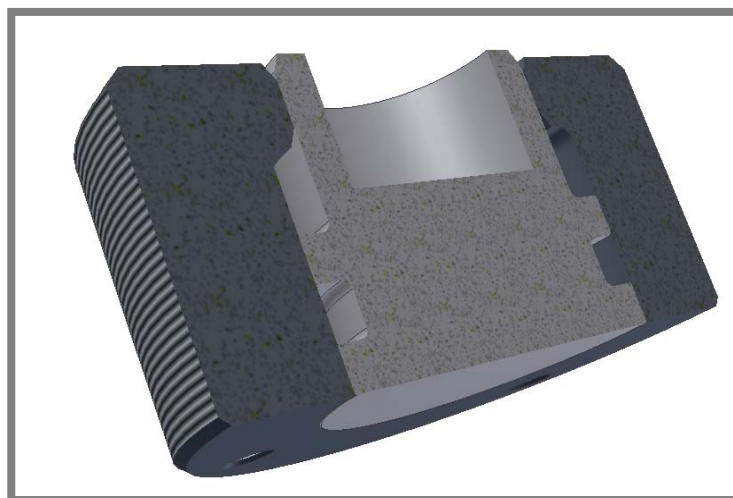
Je to nejsložitější konstrukční prvek celého zařízení. Pracovní tlak je v systému získán ovládací šroubem se závitem M12x0,5. Součástí šroubu je jistící matice, zajišťuje konstantní polohu šroubu po celou dobu měření. Slouží také jako jistící prvek proti náhodnému přesáhnutí pracovního tlaku. Šroub je v tomto případě použit jako transformátor otáčivého pohybu na pohyb přímočarý. Tento pohyb působí na tlakový píst. Do výchozí polohy je píst vrácen vlastní napjatostí systému a pomocnou tlačnou pružinou TL0630x056x0019. Pružina je z jedné strany nasazena na osazení pístku a z druhé strany se opírá o opěrný šroub. Tlakový píst je v přírubě utěsněn pomocí O-kroužku Rubena 10x6 podle PN 02 9280. Příruba je opatřena šroubením pro montáž hydraulického manometru.



Obr. 5-4 Ovládací příruba.

## 5.6 Válec

Válec je spojen s ovládací přírubou čtyřmi šrouby s válcovou hlavou M6 x 60. Proti úniku tlakového oleje mezi válcem a přírubou je utěsněn O – kroužkem pro nepohyblivé části podle PN 02 9281. Na vnější stěně je opatřen závitem M72x1 po celé jeho délce.



Obr. 5-5 Válec.

## 6 ZÁVĚR

---

**6**

Tato bakalářská práce je souhrnem konstrukčních postupů a myšlenek při návrhu konstrukce simulátoru Hertzova kontaktu. V této práci se podařilo zkonstruovat zařízení, které je kompatibilní, lehké a jednoduché na obsluhu. Výhodou zařízení je schopnost simulace kontaktní úlohy pro široký rozsah rozměrů kontaktních těles.

Velkou nevýhodou tohoto zařízení je podmínka dokonalé těsnosti hydraulické soustavy. Zařízení se od vzdušní při prvním sestavení a po každé demontáži zařízení.

Na základě této bakalářské práce bude simulátor Hertzova kontaktu realizován. Technická dokumentace, která je přílohou této práce, je zaměřena na jednoduchou výrobu jednotlivých částí zařízení. Po realizaci se musí provést kalibrace a řada testů, které odhalí případné slabiny v konstrukci.

Po realizaci optické části bude zařízení použito při výuce kontaktní mechaniky a pro studii tenkých mazacích filmů.

## 7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

---

- [1] SHIGLEY, J.E.; MISCHKE, C.R.; BUDYNAS, R.G. Mechanical engineering design. 7th ed. 2003. 1030 s. ISBN 0072520361.
- [2] SVOBODA, P., KOVÁŘÍK, R., BRANDEJS, J. *Základy konstruování*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2001. 186 s. ISBN: 80-7204-212-2
- [3] SVOBODA, P. aj. *Základy konstruování*. Výběr z norem pro konstrukční cvičení. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2001. 288 s. ISBN: 80-7204-214-9
- [4] JOHNSON, K.L. Contact mechanics [online]. Cambridge University Press, 1987 [cit. 2009-05-21]. Available from [www](http://books.google.com/books?id=Do6WQIUwbpkC&hl=cs): <<http://books.google.com/books?id=Do6WQIUwbpkC&hl=cs>>. 0521347963.
- [5] HAMROCK, B.J.; BREWE, D. Simplified Solution for stresses and Deformations. *Journal of Lubrication Technology*, 1981, 1983 (105), 171-177.
- [6] DIACONESCU, E.; GLOVNEA, M. Visualization and Measurement of Contact Area by Reflectivity. *Journal of Tribology*, 2004, 2006 (128), 915-917.
- [7] SHIMA, M., et al. New apparatus for measuring elastic modulus based on Hertzian contact. *Tokyo University Mercantile Marine*, 2001, 73-74.
- [8] FISHER-CRIPS, A.C. The Hertzian contact surface. *Journal of Materials Science*, 1999, (34), 129-137.
- [9] EGUCHI, M.; YAMAMOTO, T. Measurement of Real Contact Area Using White Interferometry for low-Reflecting Rough Surface under Non-Lubricated conditions. *Institute of Symbolic Science and Technology*, 2005, 45-52.
- [10] POLIŠČUK, R. APLIKACE BAREVNÉHO VIDĚNÍ PŘI STUDIU ELASTOHYDRODYNAMICKÉHO MAZÁNÍ. Brno: VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, 2004, 36 p.
- [11] GUNT [online]. [cit. 2009-05-21]. Available from [www](http://www.gunt.de/networks/gunt/sites/s1/mmcontent/produktbilder/04026200/Datenblatt/04026200%204.pdf): <http://www.gunt.de/networks/gunt/sites/s1/mmcontent/produktbilder/04026200/Datenblatt/04026200%204.pdf>
- [12] TecQuipment [online]. [cit. 2009-05-21]. Available from [www](http://www.tecquipment.com/Datasheets/TE98_0908.pdf): [http://www.tecquipment.com/Datasheets/TE98\\_0908.pdf](http://www.tecquipment.com/Datasheets/TE98_0908.pdf)
- [13] REDHILL [online]. [cit. 2009-05-21]. Available from [www](http://www.redhill-balls.cz): <http://www.redhill-balls.cz>

**8 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A VELIČIN****8**

---

$\mu$	-Poissonovo číslo.
$a$ (mm)	-Poloměr kontaktní oblasti.
$E$ (MPa)	-Youngův modul pružnosti.
$K$ (MPa)	-Redukovaný modul pružnosti.
$p$ (MPa)	-Tlak na obecném poloměru $r$ .
$P$ (N)	-Zatěžující síla.
$p_o$ (MPa)	-Maximální Hertzův tlak.
$R$ (mm)	-Poloměr kontaktního tělesa.
$r$ (mm)	-Obecný poloměr.
$R^*$ (mm)	-Ekvivalentní poloměr křivosti.
$z$ (mm)	-Vzdálenost od povrchu.
$\delta$ (mm)	-Relativní přiblížení.
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	-Hustota.
$\sigma$ (MPa)	-Normálové napětí.
$\tau$ (MPa)	-Smykové napětí.



## **9 SEZNAM OBRÁZKŮ, GRAFŮ A TABULEK**

### **9.1 Seznam obrázků**

Obr. 1-1	Simulátor Hertzova kontaktu TM262.
Obr. 1-2	Simulátor Hertzova kontaktu TE98.
Obr. 1-3	Simulátor Hertzova kontaktu s laserovým profilometrem.
Obr. 1-4	Digitální výstup kontaktní plochy.
Obr. 1-5	Zařízení pro měření Youngova modulu pružnosti.
Obr. 2-1	Jednoduché schéma simulátoru Hertzova kontaktu.
Obr. 2-2	Přehled nejčastějších kontaktů.
Obr. 2-3	Poloha jednotlivých os a rovin.
Obr. 4-1	Návrh zařízení s mechanickým zatížením.
Obr. 4-2	Návrh zařízení s hydraulickým zatížením.
Obr. 5-1	Řez sestavou Hertzova simulátoru.
Obr. 5-2	Geometrie uložení kuliček.
Obr. 5-3	Pracovní píst.
Obr. 5-4	Víko.
Obr. 5-5	Ovládací příruba.
Obr. 5-6	Válec.

### **9.2 Seznam grafů**

Graf 1-1	Závislost relativního přiblížení na zatěžující síle
Graf 2-1	Grafický průběh napětí

### **9.3 Seznam tabulek**

Tab. 1-1	Porovnávací tabulka
Tab. 2-1	Mechanické vlastnosti ložiskových kuliček
Tab. 2-2	Hodnoty kontaktní úlohy

## **10 SEZNAM PŘÍLOH**

**10**

---

### **10.1 Technická dokumentace**

- 1 3-3A6-00/2009
- 2 K4-3A6-00/2009
- 3 4-3A6-01/2009
- 4 4-3A6-02/2009
- 5 4-3A6-03/2009
- 6 4-3A6-04/2009
- 7 1-3A6-05/2009
- 8 4-3A6-06/2009
- 9 4-3A6-07/2009
- 10 4-3A6-08/2009
- 11 4-3A6-09/2009
- 12 4-3A6-10/2009
- 13 4-3A6-11/2009